

Conception et réalisation d'un appareil de désaimantation par champs alternatifs et son utilisation dans les études paleomagnétiques

Seguin, Maurice K.

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 25, 1975,
S.25-42



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Conception et réalisation d'un appareil de désaimantation par champs alternatifs et son utilisation dans les études paléomagnétiques

par Maurice K.-Seguin

Département de Géologie Université Laval
Québec, P.Q. G1K 7P4

Vorgelegt von André Cailleux

(Eingegangen am 24.2.1975; genehmigt in der Sitzung der Klasse für Naturwissenschaften und Mathematik am 11.4.1975)

Introduction:

La désaimantation par champs alternatifs est une technique essentielle dans les recherches paléomagnétiques. Elle a pour but principal d'identifier les types d'aimantation contenus dans la roche et d'isoler une aimantation qui peut donner des renseignements utiles relatifs à l'orientation et l'intensité du vecteur magnétique rémanent. La nature et l'origine des caractéristiques d'aimantation ne peuvent cependant être obtenues à l'aide de cette technique.

L'aimantation rémanente est une propriété de l'hystérésis. Son origine dépend de divers processus, soit uniques, soit combinés. Comme les roches ont acquis une aimantation rémanente dans le champ magnétique terrestre ayant existé dans le passé, la rémanence est alors fonction de la composition des roches et de leur histoire géologique (Seguin, 1971 a). Les différentes sortes d'aimantations naturelles rémanentes (e.g. isotherme, anhystérétique, visqueuse, thermorémanente totale ou partielle, chimique ou de sédimentation) sont généralement scindées en deux groupes. Un premier groupe englobe les aimantations naturelles rémanentes qui possèdent un long temps de relaxation telles que les aimantations thermorémanentes et chimiques; c'est principalement ce groupe qui attire l'attention en paléomagnétisme. Un second groupe comprend les aimantations naturelles rémanentes à court temps de relaxation (secondaires). Dans ce groupe, on retrouve principalement les aimantations naturelles visqueuses et isothermes.

Il n'est pas opportun, dans ce bref aperçu, d'insister sur les mécanismes grâce auxquels les roches acquièrent ces diverses sortes d'aimantations; une description assez détaillée de ces différents processus est donnée dans Seguin (1971 a). On fera cependant une courte remarque concernant la coercivité magnétique qui est la propriété la plus importante en ce qui a trait à l'aimantation rémanente. On peut définir la coercivité comme étant l'intensité d'un champ magnétique nécessaire et suffisante pour altérer l'aimantation rémanente. La coercivité magnétique peut varier entre quelques dizaines

et quelques centaines d'Ørsted dans les roches et elle est fonction de la forme, de la grosseur et de l'alignement des grains magnétiques ainsi que de la présence d'imperfections internes. La coercivité varie suivant le formule d^{-k} ou d est le diamètre du grain et k une constante qui varie avec la composition chimique de l'échantillon.

Il est souvent possible d'éliminer de certains échantillons de roches une fraction de l'aimantation rémanente acquise soit depuis le temps de leur aimantation initiale, soit depuis leur échantillonnage et d'étudier le spectre de coercivité magnétique de l'aimantation naturelle rémanente de ces échantillons. Pour ce faire, la technique du champ alternatif décroissant est celle qui est la plus couramment utilisée en paléomagnétisme. Les aimantations d'origines différentes ont généralement des spectres de forces coercitives différents et celles-ci peuvent être séparées ou éliminées par désaimantation par champs alternatifs. Les échantillons sont soumis à des champs alternatifs d'intensité maximale et le champ est abaissé à zéro régulièrement en l'absence d'un champ magnétique continu ou directionnel. Ce procédé enlève l'aimantation rémanente correspondant à la partie inférieure du spectre de forces coercitives. Au moyen de traitements successifs par champs alternatifs de plus grande intensité, on arrive à analyser les spectres de forces coercitives et à déterminer le nombre et les types d'aimantations présentes dans les roches (Thellier et Rimbert, 1954, 1955; Rimbert, 1956, 1958, 1959; Zijdeveld, 1967).

Lorsque le minéral magnétique est la magnétite, un champ alternatif de pointe de 1000 Ørsted est suffisant pour analyser la grande majorité des spectres de forces coercitives; cette technique de désaimantation est donc adéquate pour la plupart des échantillons de roches ignées (Parry, 1957; Irving, Stott et Ward, 1961). Il existe cependant des roches (surtout sédimentaires et quelques types d'ignées) dans lesquelles l'aimantation naturelle n'est guère affectée par des champs alternatifs de 1000 Ørsted (Opdyke, 1961; Irving et al., 1972) à cause de la grande coercivité de l'hématite présente dans ces roches. On peut construire des solénoïdes capables de produire des champs alternatifs de pointe allant jusqu'à 4000 Ørsted (Roy, 1973) et parvenir à analyser une plus grande étendue des spectres de grandes forces coercitives mais dans plusieurs cas la désaimantation à champs alternatifs très élevés n'est pas suffisante et il faut avoir recours à la désaimantation thermique (Collinson et Creer, 1960).

Construction d'un appareil à désaimanter par champs alternatifs

La conception d'un appareil de désaimantation par courant alternatif doit répondre à certaines exigences:

- 1) Être muni d'un système permettant d'opérer en l'absence quasi totale de champ magnétique continu de façon à éliminer la possibilité d'acquisition d'une aimantation rémanente anhystérique (Thellier et Rimbert, 1954, 1955). Il est donc préférable et souvent nécessaire d'annuler le champ magnétique terrestre.
- 2) Le solénoïde et les autres composantes situées à proximité de l'échantillon de roches à désaimanter doivent être constitués de matériaux non magnétiques.

- 3) Les hauts harmoniques d'un courant alternatif peuvent produire des champs indésirables qui sont susceptibles d'aimanter les échantillons. Il faut les éliminer à l'aide de filtres sélectifs (As, 1957).
- 4) L'amplitude du champ alternatif doit décroître de façon régulière lors de la désaimantation et pour y arriver, on peut procéder de trois façons:
 - a) en sortant l'échantillons du solénoïde
 - b) en retirant le solénoïde, l'échantillon restant en position fixe.
 - c) en réduisant l'intensité du champ alternatif en fonction du temps.

Les hauts champs alternatifs nécessitent de forts courants susceptibles de produire un échauffement dommageable du solénoïde ou une dissipation excessive d'énergie calorifique. La troisième méthode est alors avantageuse car le courant maximum ne circule que pendant une courte période de temps et la désaimantation est quasi-automatique.

- 5) Optionnellement, on peut procéder à la rotation de l'échantillon autour de deux ou trois axes lors de la désaimantation. De cette façon, les échantillons occupent successivement diverses orientations relatives à l'axe du champ alternatif de désaimantation. Cette technique additionnelle peut éventuellement avoir l'avantage d'éviter une désaimantation préférentielle des échantillons dans une direction spécifique et d'atténuer l'effet de petits champs magnétiques continus, mais elle présente l'inconvénient de nécessiter un plus grand rayon interne du solénoïde et donc de nécessiter le passage d'un courant plus élevé occasionnant un plus grand échauffement du solénoïde pour produire un champ d'intensité comparable.

Divers appareillages de désaimantation par champs alternatifs assez similaires à celui qui est présenté dans cet article ont été décrits dans la littérature scientifique (As et Zijderfeld, 1958; Rimbart, 1959; Creer, 1959; McElhinny et Gough, 1963; Larochelle et Black, 1965; McElhinny, 1966; As, 1967; Snape, 1967; Doell et Cox, 1967; Schonstedt Instrument Co., 1972; Roy, Reynolds et Sanders, 1973).

Annulation du champ magnétique continu

Pour obtenir, un espace où le champ magnétique est pratiquement nul, on utilise des bobines d'Helmholtz permettant de réduire ou de compenser le champ magnétique terrestre. Parmi les diverses méthodes utilisées pour éliminer ou réduire le champ magnétique externe (terrestre ou artificiel), la plus commune consiste en l'emploi d'un champ compensateur produit dans le sens contraire à l'aide de bobines d'Helmholtz de manière que les deux champs magnétiques soient égaux et opposés (Parry, 1967; Roy, Robertson et Keeping, 1969). Nous avons utilisé ici trois paires de bobines carrées disposées orthogonalement de façon à compenser pour chacune des trois composantes du champ magnétique terrestre indépendamment (Poitras, 1971). Les supports de ces bobines sont construits en bois dur et mesurent respectivement 114, 122 et 177 cm de côté. Leurs faces extérieures sont munies d'une rainure carrée de 1.27 cm et le fil occupe la moitié de sa section. La distance de séparation entre les bobines d'une même paire sont de 66.1, 61.7 et 57.5 cm (Côté, 1972). Le conducteur utilisé est un fil de cuivre no:

B & S 20 type HF ayant les caractéristiques suivantes: résistance en Ohm par 300 mètres à 20°C: 10.35 Ω , diamètre en millimètre: 0,8118 mm et longueur par kilogramme: 237.7 mètres.

Les bobines orientées suivant un même axe sont reliées en série de façon telle que le champ produit soit de même intensité mais de polarité inverse à la composante axiale due au champ terrestre. Les diverses paires de bobines sont branchées à une source régulière de 24 Volt pouvant fournir jusqu'à 3 Ampère. Des résistances variables dont l'ordre de grandeur est de 250 à 500 Ohm ont été utilisées dans le circuit afin de pouvoir contrôler le courant circulant dans chacune des bobines. La paire de bobines dont l'axe coïncide avec celui du solénoïde de désaimantation comprend de plus un circuit bouchon dont la fréquence de résonance ω est de 60 Hertz et qui a pour but de couper les courants induits par le champ alternatif de désaimantation. Ce circuit antirésonnant est constitué d'une inductance L et d'une capacité C placées en parallèle. Les caractéristiques électriques de ces composantes sont les suivantes: inductance $L = 0.95$ Henry, résistance $R = 26$ Ohm, capacité $C = 10$ microfarad. La fréquence de résonance est de 64 ± 5 Hertz. L'application de ce genre de circuit résonnant permet l'élimination de la tension induite par le solénoïde de désaimantation dans la paire de bobine d'Helmholtz qui lui est coaxiale. Lorsque la fréquence de la source est la même que la fréquence de résonance, on obtient un courant total (résultante de deux courants d'origine différente) qui est minimum et en phase avec la tension efficace appliquée au système. L'impédance Z_r est alors maximale et a pour valeur $Z_r = L/CR$.

Matériaux non magnétiques

Lors de la construction, on s'est limité à l'emploi des matériaux suivants: cuivre électrolytique, bois, fibre de verre, matière plastique, laiton, aluminium, caoutchouc mousse, vernis et béton dans tout l'espace situé à l'intérieur des bobines d'Helmholtz et de ce fait à l'intérieur et au voisinage du solénoïde de désaimantation. Les circuits d'alimentation des bobines d'Helmholtz et du solénoïde, les servomécanismes de même que les circuits électroniques accessoires font partie d'un seul cabinet de commande localisé à l'extérieur des bobines d'Helmholtz.

Réalisation des solénoïdes de désaimantation

Pour parvenir à fournir un champ alternatif nécessaire à la désaimantation et d'amplitude suffisante pour les besoins les plus courants en paléomagnétisme, on a construit deux (2) solénoïdes pouvant être insérés l'un dans l'autre coaxialement et utilisés indépendamment l'un de l'autre ou encore reliés en série ou en parallèle. Le système de bobines d'Helmholtz et les solénoïdes de désaimantation sont montrés sur la *Figure 1*.

Le solénoïde externe est composé de 21 rangées contenant en moyenne 171 tours de fil No: B & S 14 type HF pour un total de 3602 tours. Le fil de cuivre de ce solénoïde possède les caractéristiques suivantes: surface en "circular mils" = 4107, résistance en Ohm par 300 mètres à 20°C = 2.525 Ω , diamètre en millimètre = 1.625 mm et

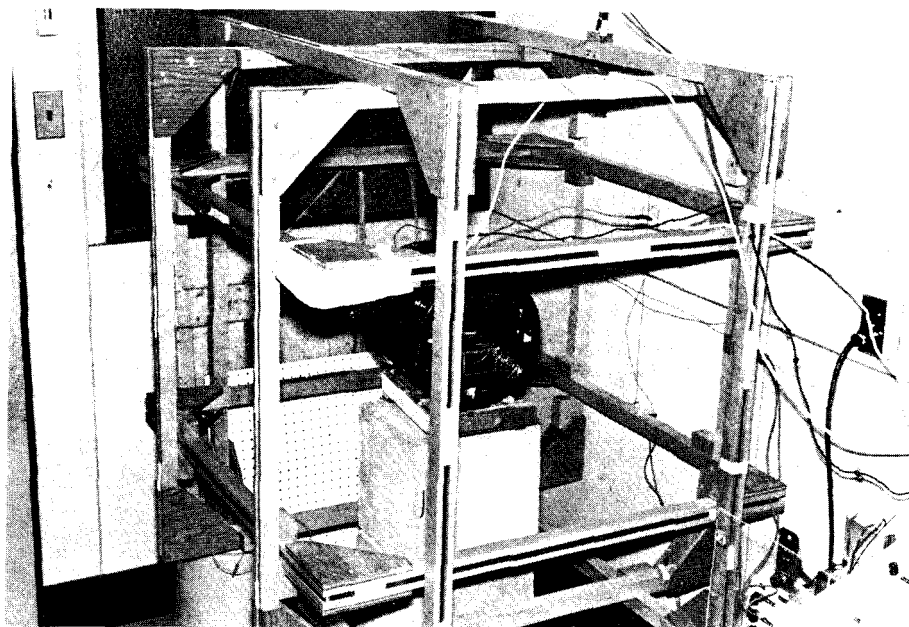


Figure 1 – Bobines d'Helmholtz et solénoïdes de désaimantation.

longueur par kilogramme = 53.6 mètres. Le poids du solénoïde est d'environ 87 kilogrammes et il est supporté par une base de blocs de béton. Le diamètre interne du solénoïde est de 22.2 cm et le diamètre externe de 29.7 cm; sa longueur est de 30 cm.

Le solénoïde interne est constitué de 17 rangs contenant en moyenne 109 tours de fil No: B & S 10 type HF. Total: 1852 tours. Le conducteur de cuivre a les caractéristiques suivantes: surface en "circular mils" = 10380, résistance en Ohm par 300 m = 0.9989 Ω , diamètre en millimètre = 10.24 mm et longueur par kilogramme = 21.6 mètres. Son diamètre interne est de 12 cm et son diamètre externe de 21.1 cm. Le poids de ce solénoïde est d'environ 50 kg. Pour les deux solénoïdes, chaque rang est séparé de ses voisins par une couche de vernis (solvant polyester No: 704 CGE) et une épaisseur de papier. La couche de vernis posée entre deux rangs de fil consécutifs a pour but de rendre l'enroulement rigide et ainsi d'éviter que la vibration due à l'oscillation du courant n'entraîne des contacts indésirables. En oscillant, les fils pourraient user le vernis qui les protège.

Le champ \vec{H} exprimé en Ørsted au centre d'un solénoïde à une seule couche est donné par la formule:

$$\vec{H} = \frac{4\pi NI}{10L} \cos \text{tg}^{-1} \frac{2r}{L} \quad \text{où } \begin{array}{l} I = \text{le courant en Ampère} \\ N = \text{le nombre total de tours} \\ L = \text{la longueur du solénoïde en mètres} \\ r = \text{le rayon moyen du solénoïde} \end{array}$$

Cette formule s'applique en première approximation avec une précision de quelque 2 à 5 % à des solénoïdes à couches multiples. Comme \vec{H} est proportionnel à I , $W = VI = R_t I^2$ avec W = la puissance exprimée en Watt, V = le voltage en Volt et R_t la résistance totale du solénoïde plus les pertes diélectriques exprimée en Ohm. I , V et H sont données en valeurs rms. Lorsque le courant circule dans un solénoïde la température fluctue et en conséquence la résistance ohmique varie. La variation de température ΔT affecte aussi les pertes diélectriques en modifiant la capacité en divers points dans le solénoïde. On ne peut donc pas considérer la résistance comme une valeur simple mais plutôt complexe. Les pertes de chaleur doivent être dissipées et l'on peut envisager deux systèmes de refroidissement des solénoïdes: l'un à l'eau et l'autre à l'air. On a opté pour ce dernier système qui est de beaucoup plus simple à construire et facile à utiliser. L'élévation de la température ΔT du solénoïde peut être calculée à l'aide de la formule suivante:

$$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = \frac{\text{chaleur } Q \text{ (en calories)}}{\text{masse (grammes)} \times \text{chaleur spécifique}}$$

$$\text{ou } Q \text{ (calories)} = 0.24 R_t I^2 t \text{ (sec)}$$

L'accroissement de température dépend du temps t requis pour réduire l'amplitude du champ à zéro (45 sec), de la pause entre deux désaimantations successives (le taux de montée du champ est de 15 sec), du taux continu de dissipation de la chaleur et de l'intensité du champ de pointe correspondant au courant maximum.

Isolation

Le fil de cuivre possède un film de formel (F) et une couverture d'un isolant épais de type H capable de supporter une température maximum de 105°C. L'épaisseur de l'isolant est d'environ 3.4 mils et la force diélectrique de quelque 4000 Volt/mil. La plus grande différence de voltage entre deux (2) fils adjacents des solénoïdes se situe à l'extrémité de 2 des 17 ou 21 couches et est égale à 302 Volt.

Les problèmes d'uniformité du champ à l'intérieur des solénoïdes à couches multiples sont étudiés en détail par Roy, Reynolds et Sanders (1973). L'uniformité du champ est davantage fonction de la longueur du solénoïde que de son rayon moyen ou de l'épaisseur des enroulements (i.e. la somme des épaisseurs des couches).

Le choix de la section du fil conducteur

Le choix du fil de cuivre utilisé pour la construction du solénoïde est d'une très grande importance car la résistance ohmique et l'épaisseur des couches en dépendent. Ces deux paramètres fixent les limites relatives à l'optimisation de l'amplitude de champ alternatifs maximaux et à la suppression ou au moins la réduction de hauts voltages de sortie.

On a vu précédemment que le champ \vec{H} est proportionnel au courant I , au nombre de tours N et à la fonction $f = \cos \text{tg}^{-1} \frac{2r}{L}$. Ainsi donc, pour des valeurs fixes de r et L ,

la valeur de la fonction f peut être accrue en diminuant l'épaisseur des enroulements ou le nombre de tours de fil N . Une réduction de N entraîne rapidement une diminution de \vec{H} , de sorte qu'une réduction de la section du fil est préférable, ce qui revient à dire que la variation de la valeur de f est de beaucoup moins importante que la variation de N pour l'obtention d'un champ maximal.

D'autre part, les paramètres I et N ne peuvent être considérés indépendamment. En effet, le courant qui circule dans le solénoïde est donné par la formule :

$$I = V/Z = V / (X_L^2 + R_t^2)^{\frac{1}{2}}$$

avec Z = l'impédance
 X_L = la réactance inductive
 et R_t = la résistance ohmique

Pour augmenter le passage du courant, i.e. pour que le circuit LR devienne efficace, pour un voltage donné, la réactance inductive provenant de la différence entre l'impédance et la résistance ohmique du solénoïde est contre-balançée par une réactance capacitive afin d'obtenir un circuit purement résistif. On parvient à ce résultat en plaçant, en série avec le solénoïde, des capacités. Le nouveau circuit RLC a alors une fréquence de résonance (résonance série) de 60 Hertz. De manière à tirer le maximum de courant de la source de 60 Hertz, l'impédance de circuit doit être minimisée, d'où $X_C = X_L$ avec X_C = la réactance capacitive, et alors $I = V/R_t$ où $R_t = R_C$ des condensateurs + R_s du solénoïde avec $R_C \ll R_s$. R_s est fonction du nombre de tours N et de la résistance R_1 du fil par unité de longueur, d'où $I = \frac{V}{N} f(R_1)$, de sorte que N est inversement proportionnel à I .

Une augmentation parallèle de I et N , ne peut donc être relié qu'à un accroissement de V ou une réduction de R_1 . Comme l'amplitude du champ \vec{H} est proportionnelle au passage du courant I , on a donc avantage à construire un solénoïde ayant la plus faible résistance possible ce qui, à toute fin pratique, signifie l'utilisation d'un fil de plus grande section. L'introduction de capacités bien ajustées (filtre de grande sélectivité) afin d'obtenir la résonance à la bonne fréquence occasionne l'apparition de hauts voltages aux bornes du solénoïde de désaimantation et des capacités intercalées en série. Les problèmes d'isolation et les dangers que de tels voltages comportent de même que la nécessité de multiplier le nombre et le volume des condensateurs mettent un frein rapide à l'obtention de champs alternatifs dont l'intensité est de l'ordre de plusieurs milliers d'Ørsted et en pratique le choix du fil se situe entre les No: 10 et 14 B et S (A.W.G.) type HF.

Système d'alimentation du solénoïde de désaimantation

L'échantillon de roche à désaimanter est placé dans un champ alternatif (60 Hertz) dont l'intensité décroît d'une valeur maximum à zéro. Au cours de ce processus, l'échantillon est aimanté dans des directions opposées telles que toute aimantation dont la force coercitive est moindre que celle du champ alternatif est enlevée. Les domaines de grande coercitivité ne sont alors pas affectés. Soit une désaimantation par champs

alternatifs cissoïdaux d'amplitude maximum \underline{A} et dont l'enveloppe des harmoniques est une fonction linéaire ou exponentielle. On considèrera une représentation simplifiée de la distribution des domaines magnétiques en fonction de leur coercitivité auxquels on injecte quelques cycles de désaimantation d'un champ alternatif produit par le solénoïde. Si la distribution de la coercitivité est uniforme à travers l'échantillon, la somme des domaines positivement aimantés est sensiblement égale à celle des domaines négativement aimantés et dans un tel cas, les aimantations opposées s'éliminent et aucun champ externe (cas idéal) n'est produit par les domaines ayant une coercitivité égale ou supérieure à \underline{A} . Le premier demi-cycle négatif ne laisse positifs que les domaines ayant des niveaux d'énergie situés entre \underline{A} et \underline{B} avec $\underline{A} > \underline{B}$ (c'est-à-dire tous les domaines dont la coercitivité est supérieure à \underline{B} ne sont pas affectés par ce demi-cycle négatif). Le même processus se répète à chaque cycle jusqu'à ce que la valeur du champ devienne nulle.

Par rotation de l'échantillon, on obtient des petits cubes au lieu de tranches de domaines magnétiques aimantés soit positivement soit négativement. Ces petits domaines cubiques sont d'autant plus nombreux que la vitesse de rotation est rapide, la fréquence du champ alternatif élevée et le temps de désaimantation lent.

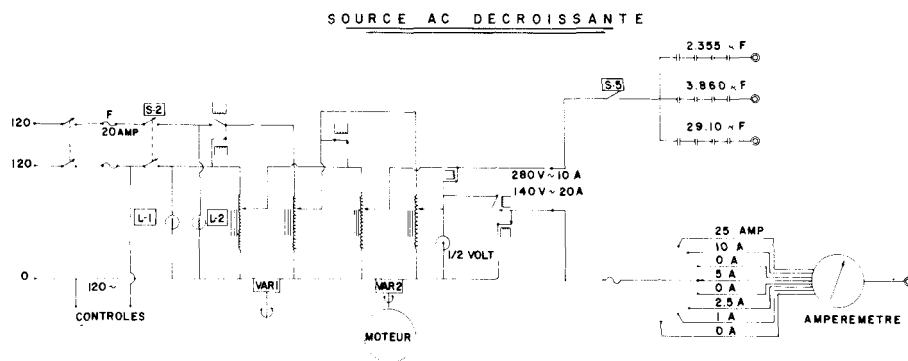


Figure 2 – Circuit de la source d'alimentation des solénoïdes.

Pour réaliser ce genre de désaimantation, il faut construire une source d'alimentation alternative dont on peut varier l'intensité maximum et qui alloue une décroissance uniforme de son débit. Pour ce faire, on a procédé en deux étapes, à savoir a) la disponibilité d'une source de courant alternatif à intensité de pointe variable (Figure 2). b) l'introduction de commandes occasionnant une décroissance uniforme du passage du courant (Figure 3).

Source de courant alternatif à amplitude de pointe variable

Le courant alternatif est directement fourni par la ligne à une fréquence de 60 Hertz. Les valeurs maximales du courant sont sélectionnées par l'intermédiaire d'un auto-transformateur (Variac). Afin de pouvoir produire des champs plus intenses, on a aug-

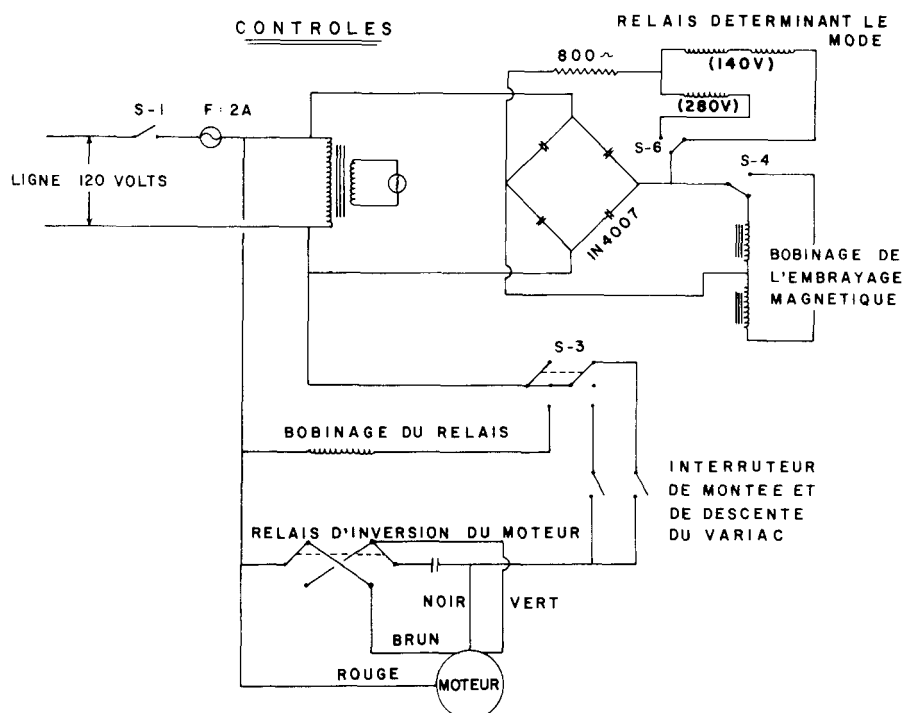


Figure 3 – Circuit des commandes permettant la désaimantation par champs alternatifs.

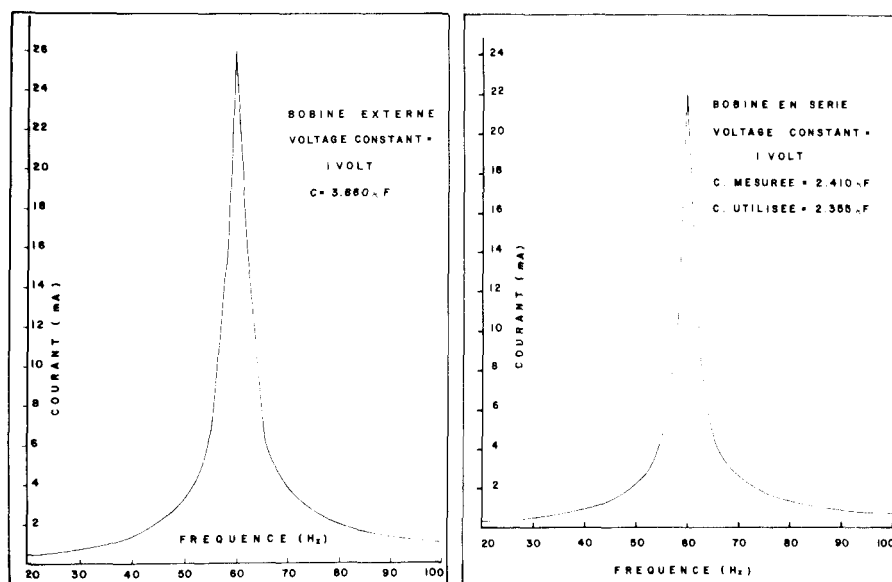


Figure 4 – Circuit résonnant série LC permettant d'obtenir un courant efficace.

menté le voltage disponible de 110 à 240 Volt. Le solénoïde a été conçu de manière à supporter des courants inférieurs à 20 Ampère sans échauffement dommageable pour des périodes de temps d'environ 2 à 5 minutes. La charge (R_L) du système demeurant constante, la variation du voltage (V) entraîne automatiquement une variation linéaire du courant (I) correspondant. Pour que le circuit électrique du solénoïde ou des solénoïdes rende ce courant efficace, on a construit des filtres sélectifs (circuits résonnants série LC, voir Table 1 et *Figure 4*) permettant d'éliminer la réactance inductive X_L dans le solénoïde et la réactance capacitive X_C dans la banque de condensateurs.

Table I

Solénoïde(s)	Résistance R (Ohm)	Inductance L (Henry)	Capacité des condensateurs (microfarad)
Interne	3.7	0.235 H	29.12 F
Externe	25.0	2.040 H	3.860 F
En série	28.1	3.265 H	2.410 F

En l'absence de champs continus, une différence dans les valeurs de crête opposées du champ alternatif peut être le résultat de la présence d'harmoniques paires. Les aimantations des échantillons sont très sensibles à ces divers harmoniques et ils doivent par conséquent être filtrés. Il faut donc procéder à l'élimination d'un harmonique à 120 Hertz que la source peut fournir. On évite le passage de courant oscillant à cet harmonique dans le solénoïde de désaimantation au moyen d'un circuit résonnant dont l'impédance à 120 Hertz est moindre que celle du circuit résonnant (fondamentale $f_0 = 60$ Hertz) du solénoïde de désaimantation. On élimine le premier et principal harmonique à 120 Hertz du solénoïde en le faisant passer par un second filtre sélectif, i.e. un circuit résonnant série L'C', passe-bande de 120 Hertz. Les harmoniques inférieurs à 120 Hertz sont ignorés car ils sont de très faible intensité. Le courant de 60 Hertz qui circule dans le circuit RLC rencontre dans le premier filtre sélectif LC une impédance théorique égale à la résistance ohmique R_s du solénoïde, alors que dans le second filtre sélectif L'C', il rencontre une impédance donnée par la formule $Z'_{60} = R_L' + X_L' - X_C'$. Dans le cas de l'harmonique de 120 Hertz, l'impédance Z_{120} du premier circuit RLC est moindre que celle du second circuit R'L'C'. Le courant choisit le parcours le plus facile et circule entièrement, pour la fondamentale à 60 Hertz, dans le solénoïde de désaimantation ou, pour l'harmonique de 120 Hertz, dans le filtre de déviation L'C'.

Décroissance uniforme du courant alternatif

La source doit fournir un courant dont la valeur décroît en fonction du temps, i.e. que l'intensité du courant diminue d'un maximum fixé jusqu'à la valeur zéro. Cette opération peut être réalisée à l'aide d'une inductance à noyau variable (inductrol), d'une résistance variable obtenue au moyen d'une colonne d'électrolyte, d'un circuit électronique approprié (diodes barrières type SCR) ou d'un autotransformateur (Variac). Le premier système (Inductrol) est préférable mais il est le plus dispendieux.

Table II

Solénoïde(s)	Intensité du champ H (rms) par Ampère (Ørsted/Ampère)	Champ de pointe H_p par Ampère (Ørsted/Ampère)	Courant I (max) (Ampère)	H_p maximum (Ørsted)	Voltage (rms) maximum de sortie au solénoïde(s) (Volt)
Interne	70.6	99.8	18.5 A	1850	2480 V
Externe	114.9	162.5	7.8 A	1270	6341 V
En série	183.6	259.6	7.0 A	1820	6267 V

Notre appareillage a été réalisé à l'aide d'un second autotransformateur couplé à un moteur fonctionnant en courant continu. Ce dernier sert à entraîner, à vitesse constante, le rotor de l'autotransformateur. On obtient ainsi un courant décroissant dont la pente est la même que celle du champ alternatif correspondant (Table II). Pour changer cette rampe, il suffit de varier la vitesse du moteur et on obtient ainsi différents temps de désaimantation. Un de ces moteurs permet d'obtenir un temps de descente de 45 secondes pour les champs d'intensité de pointe de 0–800 Ørsted et un second de 90 secondes pour les champs d'intensité de pointe de 800–2000 Ørsted. Le temps de montée est fixe (15 secondes). L'autotransformateur présente un inconvénient par rapport à l'inductrol lorsqu'il effectue le mouvement de descente du champ. L'inductrol permet la réalisation d'une descente parfaitement régulière. Même lorsque l'autotransformateur est commandé par un moteur synchrone dont la vitesse angulaire est parfaitement uniforme, la rampe n'est pas entièrement droite mais indique des modulations dues au fait que le nombre fini d'enroulements de fil occasionnent de petits segments de pente discontinus sur la rampe. Ainsi, lors du passage d'un courant de pointe maximum, un temps de descente de 45 secondes combiné à une fréquence de 60 Hertz occasionne 2700 cycles de désaimantation entre le courant de pointe et un courant nul. Comme le Variac est constitué de quelque 200 enroulements de fil, une discontinuité dans les segments de pente se produira tous les 14 cycles (0.23 seconde) au minimum. Si le courant de pointe est moindre, le même nombre de cycles est distribué sur une quantité réduite d'enroulements et les segments de pente s'établissent sur des bases plus grandes que 14 cycles (> 0.23 sec.). Si au lieu d'utiliser le premier moteur, on commande l'autotransformateur à l'aide du second moteur dont le temps de descente est de 90 secondes, une discontinuité dans les segments de pente se produira seulement tous les 27 cycles (0.45 seconde) au minimum. Les calculs démontrent qu'une plus grande fréquence du courant alternatif, un moins grand nombre d'enroulements sur le Variac et une descente plus lente du champ minimisent le nombre de segments lors d'une descente linéaire de l'intensité du champ en fonction du temps. Une fréquence élevée (60–50 Hertz) rend possible l'utilisation avantageuse de l'autotransformateur pour ce genre d'opération. L'augmentation du temps de descente n'est pas économique et l'utilisation de forts courants favorise l'échauffement tandis que la diminution du nombre d'enroulements au Variac accentue l'irrégularité de la rampe linéaire bien qu'elle augmente la longueur relative des segments de droite discontinus.

Support de l'échantillon et insertion d'un appareil à bascule

Afin que la désaimantation soit uniforme et isotrope, il faut soumettre l'échantillon à un champ alternatif suivant diverses orientations. Ceci peut être effectué à l'aide d'un appareil à bascule ou en désaimantant suivant les trois axes. On n'a pas encore démontré définitivement la nécessité d'un appareil à bascule ou sa supériorité par rapport à un système de désaimantation à trois axes.

Lorsqu'on utilise un appareil à bascule, il faut que le déplacement angulaire soit totalement aléatoire et assez rapide (2 à 5 Hertz). Les appareils à bascule sont construits suivant divers systèmes de rotation; certains tournent suivant deux axes, d'autres trois (Cox et Doell, 1963; Doell et Cox, 1967). Les rapports entre les différentes vitesses angulaires des divers axes sont habituellement fixes et reliés au rapport des engrenages du système (Roy, Reynolds, et Sanders, 1973). Une analyse du comportement de ce genre de systèmes (deux ou trois axes à engrenages) est présentée dans Hutchings (1967).

On peut utiliser un appareil à bascule de trois axes à engrenages ayant un diamètre de 10 cm dans le solénoïde interne. L'appareil à bascule utilisé dans le solénoïde externe consiste en une sphère fabriquée de plexiglass, capable de contenir des échantillons cylindriques ou cubiques dont les dimensions respectives sont de 3.2 cm de diamètre, 2.54 cm de longueur et 2.54 cm de côté, la sphère tournant autour des trois axes avec des vitesses angulaires variables et indépendantes. La transmission de la rotation à la sphère s'effectue par l'intermédiaire de roues de caoutchouc actionnées au moyen de différentiels et de moteurs synchrones à vitesse variable. Ce système permet une grande souplesse quant au choix des axes et des vitesses de rotation. Aucun des matériaux constituant cet appareil à bascule n'est magnétique. Afin d'éliminer l'emploi de coussinets, on a usiné les pièces du support et les pièces mobiles qui viennent en contact avec deux matériaux différents, à savoir en aluminium et en laiton respectivement. La sphère de plexiglass est constituée de deux hémisphères reliés par des vis afin de pouvoir y introduire les échantillons.

La désaimantation d'échantillons suivant les trois axes peut être effectuée soit un par un soit en groupe. Dans ce but, on a procédé à l'installation d'une tablette de fibre de verre placée à l'horizontale au centre des solénoïdes. Lors d'une désaimantation des échantillons un par un, on fixe l'échantillon dans un support de plexiglass que l'on insère dans une rainure découpée dans la tablette. Lorsqu'on procède à une désaimantation en groupe en utilisant le solénoïde externe, les échantillons sont introduits dans un récipient cubique de plexiglass placé sur la tablette au centre du solénoïde; le récipient cubique peut contenir une dizaine d'échantillons. Dans les deux cas, on procède de la même façon à une désaimantation successive suivant les trois axes.

Mode d'opération

Le système de commandes des solénoïdes de désaimantation et des bobines d'Helmholtz apparaît sur la *Figure 5*. Après s'être assuré que tous les interrupteurs de même que le premier autotransformateur contrôlant le champ de pointe sont en position 0,

on établit le contact de la source principale. On choisit alors l'échelle d'ampérage suivant le champ désiré:

- Echelle 1 A – pour un champ de 60 Ørsted ou moins
- Echelle 2 A – pour un champ de 150 Ørsted ou moins
- Echelle 5 A – pour un champ de 325 Ørsted ou moins
- Echelle 10 A – pour un champ de 800 Ørsted ou moins
- Echelle 25 A – pour tous les autres cas.

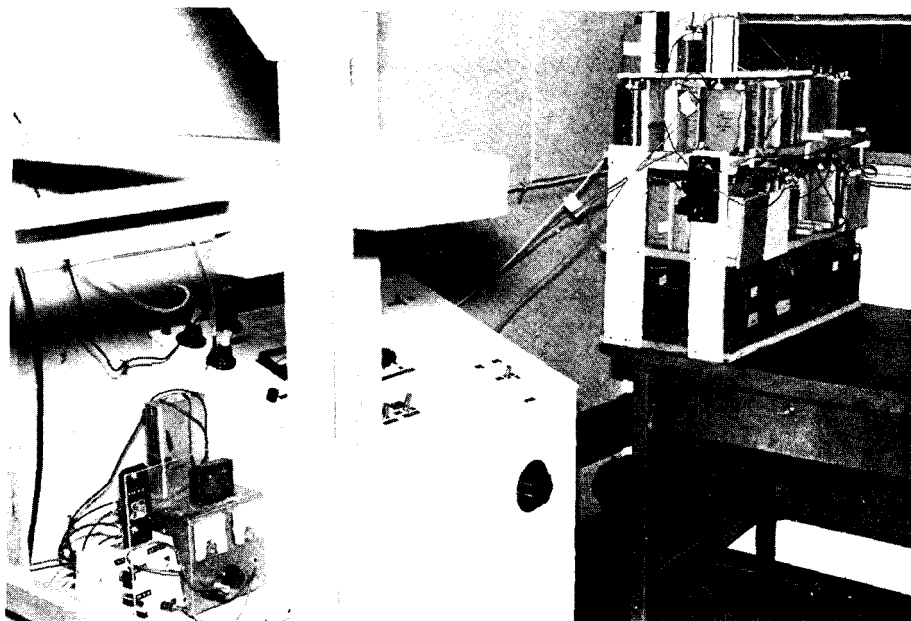


Figure 5 – Photo illustrant la boîte des commandes des solénoïdes et des bobines d'Helmholtz.

On place les interrupteurs S-1 et S-2 (Figures 2 et 3) pour l'alimentation de 120 et 240 Volt respectivement en position 1 et l'interrupteur S-3 contrôlant l'arrêt et la marche avant et arrière du moteur couplé au second autotransformateur en position: "montée". On place ensuite l'interrupteur S-4 commandant la vitesse de montée ou de descente du second autotransformateur en position: "rapide" et l'interrupteur S-5 contrôlant le courant destiné au solénoïde de désaimantation à l'indicateur 1 lorsque le bruit du moteur cesse. Puis on tourne le bouton du premier autotransformateur dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à ce que l'ampèremètre indique le courant correspondant au champ désiré en ayant bien soin de sélectionner l'échelle appropriée. On place alors l'interrupteur S-3 contrôlant l'arrêt et la marche avant ou arrière du moteur couplé au second autotransformateur en position de "descente" et l'interrupteur S-5 distribuant le courant au solénoïde en position 0 seulement après que l'ampèremètre n'indique plus de courant. Ce dernier point est très important car si le circuit est ouvert lorsqu'un courant y circule, de grandes décharges électriques peuvent se produire.

L'opération routinière de désaimantation peut se résumer à la procédure simplifiée suivante :

Après avoir établi le contact de la source de courant continu servant à alimenter les bobines d'Helmholtz, on place l'interrupteur S-4 en position "rapide" et l'interrupteur S-3 en position de "montée". Après avoir introduit l'échantillon dans le solénoïde ou procédé à une rotation de 90° dans le cas d'une désaimantation suivant les trois axes, on place l'interrupteur S-5 en position 1, l'interrupteur S-4 en position "lent" et l'interrupteur S-3 en position de "descente". Lorsque l'ampèremètre n'indique plus de courant, le moteur arrête de fonctionner automatiquement et on place l'interrupteur S-5 en position 0. Après avoir effectué cette série de manipulation, on est prêt à recommencer la désaimantation suivante en plaçant d'abord l'interrupteur S-4 en position "rapide". Lorsque l'on a terminé toute une série de désaimantations, on vérifie alors que l'ampèremètre n'indique plus de passage de courant et on place le premier autotransformateur de même que les interrupteurs S-1, S-2, S-3 et S-5 en position 0. On coupe ensuite le contact de la source de courant continu alimentant les bobines d'Helmholtz de même que celui de la source principale.

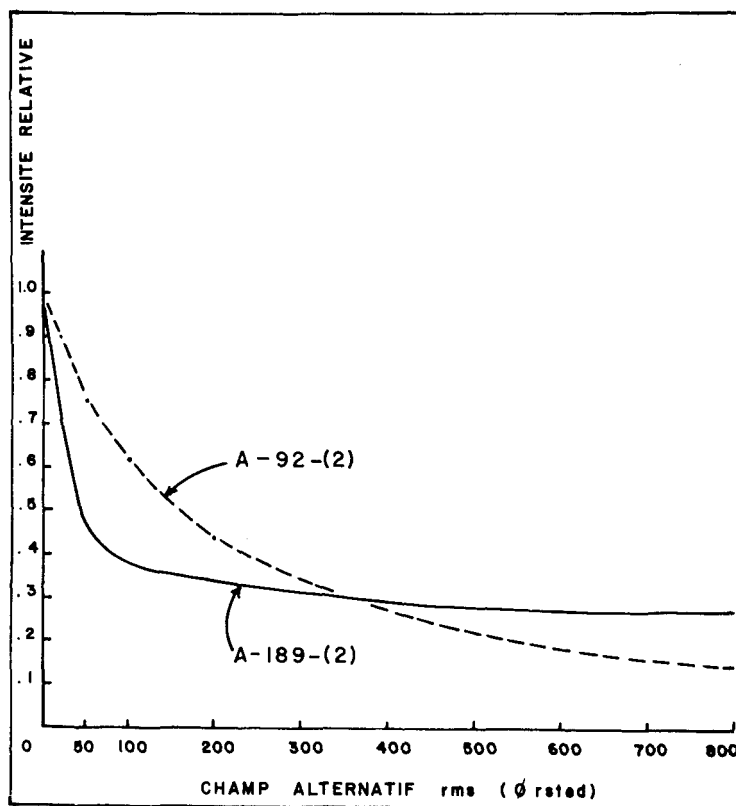


Figure 6 - Exemples de décroissance de l'amplitude du M.R.N. en fonction de l'intensité de la désaimantation par champs alternatifs.

Rendement

L'appareillage de désaimantation est en opération depuis plus d'un an. Pendant cette période, on a affectué quelques 5000 désaimantations parmi lesquelles on a incorporé divers projets pilotes comprenant plusieurs désaimantations successives avec un champ de pointe élevé sur un même échantillon. Quelques exemples de désaimantation par champs alternatifs ont déjà été publiés (Seguin, 1971b, 1972a, 1972b, 1973) et d'autres sont actuellement en cours. La Figure 6 fait voir la décroissance de l'intensité du vecteur magnétique rémanent naturel en fonction de l'augmentation de l'intensité du champ de désaimantation pour les échantillons No: A-92-(2) et A-189-(2). La Figure 7 montre la variation de l'orientation du vecteur magnétique rémanent naturel en fonction de l'augmentation de l'intensité du champ de désaimantation pour les mêmes échantillons. Les

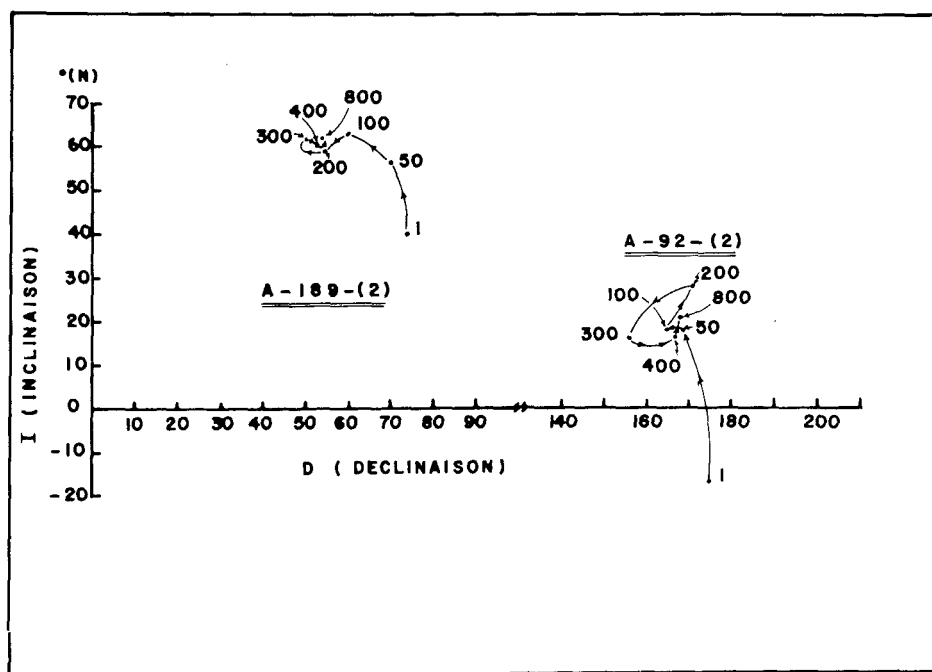


Figure 7 – Variation de la direction du M.R.N. en fonction de la variation de la désaimantation par champs alternatifs.

changements d'orientation entre 400 et 800 Oersted (rms) sont inférieurs à 4° pour les deux échantillons considérés. L'échantillon No: A-92-(2) est une roche sédimentaire à quartz et carbonatée (ankérite et sidérose) métamorphisée, bien litée et à grain moyen contenant des amphiboles et des traces de magnétite. L'échantillon No: A-189-(2) est un schiste à quartz, magnétite et hématite spéculaire, à grain fin contenant quelque 20 à 50% de magnétite en volume, des carbonates (dolomie et sidérose) et de la limonite.

Remerciements:

L'auteur remercie M. Maurice A. Côté, ingénieur physicien et M. Richard Fillion, technicien en électronique, pour l'assistance qu'ils ont apporté lors de la réalisation de cet appareillage. Il adresse aussi un merci tout spécial à M. J.L. Roy de la Division du Géomagnétisme, Direction de la Physique du Globe, Ottawa, pour ses nombreux et judicieux conseils. Les fonds proviennent en grande partie de l'octroi No: 1135-D13-3-287/73 de la Commission Géologique du Canada et No: A7070-1972 du Conseil National des Recherches du Canada.

Références:

- As, J. A. (1967): The A.C. demagnetization technique dans *Methods in palaeomagnetism*, D.W. Collinson, K.M. Creer and S.K. Runcorn, etc., Elsevier Press, Amsterdam, p. 221–223.
- As, J. A. et Zijdeveld, J. D. A. (1958): Magnetic cleaning of rocks in palaeomagnetic research. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, Vol. 1, p. 308–319.
- Collinson, D. W., et Creer, K. M. (1960): Measurements in palaeomagnetism dans *Methods and Techniques in Geophysics*, Vol. 1, Interscience Publishers Inc. p. 108–210.
- Côté, M. A. (1972): Conception et réalisation d'un démagnétiseur à courant alternatif. Thèse de Baccalauréat ès Sciences Appliquées, Génie Physique, Université Laval, 31 pp, Avril.
- Cox, A. V. et Doell, R. R. (1963): Analysis of partial alternating field demagnetization apparatus. 44th Annual Meeting, Am. Geophys. Union, Washington, D.C., April 1963.
- Creer, K. M. (1959): A.C. magnetization of unstable Triassic Keuper Marls from S.W. England. *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, Vol. 2, p. 261–275.
- Doell, R. R. et Cox, A. V. (1967): Analysis of alternating field demagnetization equipment dans *Methods in palaeomagnetism*, D. W. Collinson, K. M. Creer and S. K. Runcorn, etc. Elsevier Press, Amsterdam, p. 241–253.
- Hutchings, A. (1967): Computations of the behaviour of two- and three-axis rotation systems dans *Methods in palaeomagnetism*, Elsevier, Amsterdam, p. 224–236.
- Irving, E., Park, J. K., et McGlynn, J. C. (1972): Paleomagnetism of the Et-Then Group and Mackenzie Diabase in the Great Slave area. *Can. Journ. Earth Sci.*, Vol. 9, p. 744–755.
- Irving, E., Stott, P. M., et Ward, M. A. (1961): Demagnetization of igneous rocks by alternating magnetic fields. *Phil. Mag.*, Vol. 6, p. 225–241.
- Larochelle, A., et Black, R. F. (1965): The design and testing of an alternating field demagnetizing apparatus. *Can. Journ. Earth Sci.*, Vol. 2, p. 684–696.
- McElhinny, M. W. (1966): An improved method for demagnetizing rocks in alternating magnetic fields. *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, Vol. 10, p. 369–374.
- McElhinny, M. W. et Gough, D. I. (1963): The palaeomagnetism of the Great Dyke of Southern Rhodesia. *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, Vol. 7, p. 287–303.
- Opdyke, N. D. (1961): The palaeomagnetism of the New Jersey Triassic: a field study of the inclination error in red sediments. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, p. 1941–1949.
- Parry, J. H. (1957): The problem of reversed magnetization and its study by magnetic methods. *Adv. Phys.*, Vol. 6, p. 299–305.
- Parry, J. H. (1967): Helmholtz coils and coil design dans *Methods in palaeomagnetism*, Elsevier, Amsterdam, p. 551–567.
- Poitras, A. (1971): Etude sur l'annulation du champ magnétique terrestre. Thèse de Baccalauréat ès Sciences Appliquées, Génie Physique, Université Laval, 23 pp, Avril.

- Rimbert, F.* (1956): Sur l'action de champ alternatifs sur des roches portant une aimantation rémanente isotherme de viscosité. Acad. Sci. (Paris), Comptes rendus, Vol. 242, p. 2536–2538.
- Rimbert, F.* (1958): Thèse. Faculté des sciences, Université de Paris, France.
- Rimbert, F.* (1959): Contribution à l'étude de l'action des champs alternatifs sur les aimantations rémanentes des roches. Rev. Inst. Franç. Pétrole, Ann. Combust. Liquides, Vol. 14, No. 1, p. 17; No. 2, p. 123.
- Roy, J. L., Reynolds, J., et Sanders, E.* (1973): An alternating field demagnetizer for rock magnetism studies. Publications of the Earth Physics Branch, Ottawa, Vol. 44, No. 3, p. 37–45.
- Roy, J. L., Robertson, W. A., et Keeping, C.* (1969): Magnetic "field free" spaces for paleomagnetism, rock magnetism and other studies. Can. Journ. Earth Sci., Vol. 6, p. 1312–1316.
- Schonstedt Instrument Company* (1972): AC demagnetizer Model GSD-1. Technical Bulletin. Schonstedt Co., Reston, Virginia, 4 pp.
- Seguin, M. K.* (1971 a): La géophysique et les propriétés physiques des roches. Les Presses de l'Université Laval, 562 pp.
- Seguin, M. K.* (1971 b): Final interpretation of the remnant magnetic study within a 40 mile radius from Schefferville as a tool in the search of high grade magnetic taconite. Open file report to IOCC, June 2nd, 35 pp.
- Seguin, M. K.* (1972 a): Etude et application du magnétisme rémanent naturel à la découverte de gisements de taconite magnétique. Pure and Applied Geophysics, Vol. 97, No. 5, p. 156–174.
- Seguin, M. K.* (1972 b): The magnetic properties of the diabase dikes of the central part of the Labrador trough. Naturaliste Canadien, Vol. 99, p. 635–655.
- Seguin, M. K.* (1973): Interpretation of the N.R.M. measurements for the main project of the southern extension of the Labrador trough. Open file report to IOCC, October 23rd, 128 pp.
- Snape, C.* (1967): A 500 c/sec alternating field demagnetization apparatus *dans* Methods in palaeomagnetism, D. W. Collinson, D. M. Creer and S. K. Runcorn, etc. Elsevier Press, Amsterdam, p. 237–240.
- Thellier, E. et Rimbert, F.* (1954): Sur l'analyse d'aimantations fossiles par action de champs magnétiques alternatifs. Acad. Sci. (Paris), Comptes rendus, Vol. 239, p. 1399–1401.
- Thellier, E. et Rimbert, F.* (1955): Sur l'utilisation en paléomagnétisme, de la désaimantation par champs alternatifs. Acad. Sci. (Paris), Comptes rendus, Vol. 240, p. 1404–1406.
- Zijderveld, J. D. A.* (1967): A.C. demagnetization of rocks; analysis of results *dans* Methods in palaeomagnetism, D. W. Collinson, K. M. Creer and S. K. Runcorn, etc. Elsevier Press, Amsterdam, p. 254–286.

Zusammenfassung:

Dieser Aufsatz behandelt Entwurf, Konstruktion, Kenndaten und Betrieb eines Apparates zur Entmagnetisierung mittels Wechselfeldern. Parameter von Solenoiden mit innerem Halbmesser von 12,0 bis 22,2 cm weisen darauf hin, daß Wechselfelder von einigen Tausend Ørsted zu erreichen sind mit Benutzung von Leitern großen Querschnitts, weil für die Konstruktion solcher Solenoide der Ohmsche Widerstand maßgebend ist. Gleichförmigkeit des Feldes, Kerngröße, die entwickelte Hochspannung und Temperaturanstieg begrenzen die Möglichkeit der Parameterwahl und erschweren die technische Lösung. Ausführlich wird beschrieben ein Solenoid mit 12,0 cm Kern, das Wechselfelder mit Spitzenwerten von 2000 Ørsted entwickeln kann.

Dieses Solenoid ermöglicht die Untersuchung von bestimmter Fossilmagnetisierung in Gesteinen mittels zweier Autotransformatoren, die eine Abminderung des Wechselfeldes erlauben. Der Durchmesser des Solenoidkernes ist groß genug, um das Einsetzen

einer Kippeinrichtung zu gestatten, die allgemein benutzt wird, um die Orientation der Gesteinsprobe zu ändern und dadurch die remanente anhysteretische Magnetisierung zu verhindern. Die Einzelteile des Entmagnetisierungsapparates werden der Reihe nach besprochen.

Résumé:

Cet article traite de la conception, de la construction, des caractéristiques et du fonctionnement d'un appareil de désaimantation par champs alternatifs. Les paramètres des solénoïdes de rayon interne de 4.7 à 8.7 pouces (12,0 à 22,2 cm) indiquent que, pour obtenir des champs alternatifs de quelques milliers d'Ørsted, il faut utiliser un fil conducteur ayant une grande section car la résistance ohmique est le facteur primordial pour la construction de tels solénoïdes. L'uniformité du champ, la grosseur du noyau, la haute tension développée et l'élévation de la température restreignent les possibilités dans le choix des paramètres et augmentent les difficultés techniques de la construction. Un solénoïde (noyau = 12,0 cm) qui peut produire des champs alternatifs de pointe de 2000 Ørsted est décrit en détail.

Au moyen de deux autotransformateurs permettant de réduire le champ alternatif, ce solénoïde rend possible l'étude de certaines aimantations fossiles que l'on retrouve dans les roches. Le diamètre du noyau du solénoïde est suffisamment grand pour permettre l'insertion d'un appareil à bascule généralement utilisé pour changer l'orientation de l'échantillon rocheux dans le but de prévenir l'acquisition d'aimantation rémanente anhystérétique. Les parties essentielles de l'appareil à désaimanter sont étudiées une à une.

Abstract:

This paper deals with the conception, construction, characteristics and operation of an alternating field demagnetizing unit. The parameters of solenoids having internal diameters ranging from 4.7 to 8.7 inches (12,0 to 22,2 cm) show that, in order to obtain alternating fields of some thousands of Ørsted, it is necessary to use a conducting wire having a large section because the resistance is the main factor influencing the construction of such solenoids. The uniformity of the field, the size of the core, the high tension created and the increase in temperature narrow the range for the choice of these parameters and increase the technical difficulties in their construction. A solenoid (core = 12,0 cm) capable of creating alternating fields of 2000 Ørsted (peak to peak) is described in detail.

With the help of two autotransformers allowing a decrease of the alternating field, this solenoid is used to study paleomagnetic properties of rocks and the behaviour (experimental psychology) of small animals (Bartley white rats, baby rabbits and cats) in alternating fields of relatively high intensity. The diameter of the solenoid core is sufficiently large to allow the insertion of a tumbler used to change the orientation of the rock sample in order to minimize the acquisition of anhysteretic remanent magnetisation. The essential parts of the demagnetizing apparatus are investigated one after the other.